

VI CONGRESO IBÉRICO de AgroIngeniería

5 a 7 de Septiembre | 2011
Universidade de Évora | Portugal



Comparación de índices ópticos de imágenes hiperespectrales en relación con madurez de melocotón: capacidad de detección y robustez

L. Lleó¹, J.M. Roger², A. Herrero-Langreo³, B. Diezma-Iglesias³, P. Barreiro³, M. Ruiz-Altisent³

¹Departamento de Ciencia y Tecnología Aplicadas a la Ingeniería Técnica Agrícola. Universidad Politécnica de Madrid. España. E-mail: lourdes.lleo@upm.es

²CEMAGREF. Montpellier, Francia

³LPF-TAGRALIA. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Resumen

La presente investigación se centra en el uso de la visión artificial para determinar la maduración del melocotón rojo de pulpa blanda ('Richlady'). La visión artificial permite una determinación espacial detallada del estado de maduración del fruto. Los índices ópticos considerados (Ind_1 e Ind_2 , propuestos en la actual investigación, e Ind_3 e I_{AD} , propuestos por otros autores) se basan en la combinación de longitudes de onda en la zona del pico de absorción de la clorofila (680 nm). Ind_1 corresponde aproximadamente a la profundidad del pico de absorción, e Ind_2 corresponde a la profundidad relativa. Se obtuvo una imagen artificial de cada índice computada a partir de imágenes hiperespectrales. Todos los índices fueron capaces de corregir el efecto de la convexidad (a excepción de los melocotones recién cosechados y para el Ind_1). Ind_2 es el índice con mayor capacidad de discriminación en diferentes estados de madurez. Por otra parte Ind_2 permite la diferenciación de regiones de maduración dentro de los frutos, mostrando la evolución de esas regiones durante la maduración.

The present research is focused on the application of artificial vision to assess the ripening of red skinned soft-flesh peach ('Richlady'). Artificial vision allows a spatially detailed determination of the ripening stage of the fruit. The considered optical indexes (Ind_1 and Ind_2 , proposed in the present research, and Ind_3 and I_{AD} , proposed by other authors) are based on the combination of wavelengths close to the chlorophyll absorption peak at 680 nm. Ind_1 corresponds approximately to the depth of the absorption peak, and Ind_2 corresponds to the relative absorption peak. An artificial image of each index was obtained by computing the corresponding reflectance images, which were acquired with a hyperspectral camera. All indexes were able to correct convexity (except for the just-harvested peaches and for Ind_1). Ind_2 is the preferred index; it showed the highest discriminating power between ripening stages and no influence of convexity. Ind_2 also allowed the differentiation of ripening regions within the fruits, and it showed the evolution of those regions during ripening.

Palabras Clave: visión, hiperespectral, madurez, melocotón, índices ópticos

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de la calidad de las frutas, y en particular del melocotón, es importante para establecer la fecha óptima de recolección y el tratamiento postcosecha más adecuado. Como es bien sabido, el grado de madurez de los frutos se puede estimar tanto a partir de medidas destructivas (firmeza, sólidos solubles) como no destructivas (respuesta al impacto, acústica, propiedades ópticas) (Lu and Peng, 2006; Ziosi et al., 2008; Diezma et al. 2006). La firmeza y el color evolucionan de forma paralela desde la cosecha hasta la madurez de consumo. Sin embargo ciertas incidencias, como cambios en la temperatura de almacenamiento, pueden romper ese paralelismo

afectando sobre todo a la firmeza. Aunque la relación entre ambos parámetros no sea total, dicho paralelismo permite que, basándonos en medidas no destructivas ópticas, podamos inferir el estado de firmeza de la fruta como se discute más adelante.

La evolución de los pigmentos durante el proceso de maduración se puede detectar mediante técnicas espectrales y de visión. Es crucial encontrar aquellos cambios espectrales que se producen. La visión artificial permite obtener una información detallada del estado del fruto en toda la superficie, mientras que la medición mediante espectrofotómetros sólo permite determinar el espectro de un área limitada. La posible heterogeneidad del proceso de maduración, tal como sucede en el melocotón (Crisosto et al., 2001), y la detección de defectos es posible empleando imágenes multi e hiperspectrales, que son más sensibles que las imágenes tradicionales RGB (Lu and Peng, 2007, Qin and Lu, 2008). Dependiendo de la variedad, hay zonas de los frutos que maduran antes que otras, por ejemplo el ápice, haciéndolos más susceptibles a daños que se pueden producir en el manejo postcosecha. Es por ello por lo que resulta necesario desarrollar técnicas no destructivas que permitan una visión detallada y espacial del estado de maduración del fruto. La visión artificial puede ayudar a clasificar los frutos según su estado de madurez, ayudando en la decisión de su destino óptimo: frutos maduros a mercados locales, frutos no maduros que necesiten un proceso de maduración posterior...etc.

Índices espectrales

Los índices espectrales consisten en la medida de una determinada longitud de onda, de un ratio o diferencia de longitudes de onda, o en el cómputo de la derivada del espectro en una determinada zona, donde se producen los cambios. El empleo de ratios o diferencias permite corregir efectos producidos por la cantidad de luz, la geometría, diferentes sensores, etc. (Xue, 2009). El empleo de un ratio o de una diferencia es preferible al uso de una única longitud de onda, porque esta puede estar afectada por la cantidad de luz, la geometría del fruto o cualquier otra circunstancia ajena a la propiedad a detectar. Muchos estudios consideran la banda de absorción de la clorofila y la del agua como las más relacionadas con el estado de madurez y la firmeza. (Peng and Lu, 2007, McGlone et al 1997, Ferrer et al 2005). Hay muchos estudios que tienen en cuenta índices espectrales en relación con madurez, daños etc. (Zude, 2003; Qin y Lu, 2008) donde en cada caso se define la combinación más conveniente. Zude (2003) compara nueve índices espectrales relacionados con madurez en manzanas, incluyendo NDVI y ratios como 698 nm/ 780 nm. Ziosi et al. (2008) considera el índice de diferencias de absorbancias ($IAD=A_{670}-A_{720}$); que también está relacionado con madurez en melocotón.

Ruiz-Altisent et al (2006) muestran que la reflectancia a 680 nm está inversamente relacionada con la firmeza en distintas variedades de melocotón rojo y amarillo. Por otra parte Lleó et al. (2009) y Herrero-Langreo (2011) han estudiado imágenes artificiales del ratio 680 nm/800 nm de frutos enteros en relación con madurez. Han observado que a medida que los frutos maduran la reflectancia aumenta y los histogramas de las imágenes se desplazan hacia mayores niveles de intensidad de luz. Al aplicar un sistema de clasificación a los histogramas de dichas imágenes, basado en el método de Ward, es posible clasificar los frutos en distintos grados de madurez y firmeza. Ese mismo ratio 680 nm/800 nm lo emplean Sims y Gamon (2002) en detección remota del estado de la vegetación.

La visión hiperespectral es una herramienta muy potente que permite encontrar la mejor combinación de longitudes de onda en relación con el problema a resolver, en este caso discriminar entre distintos grados de madurez.

El presente trabajo está centrado en la aplicación de la visión hiperespectral como herramienta para buscar el índice óptico óptimo en relación con la madurez en melocotón. Se propone un procedimiento de comparación de imágenes artificiales que permite seleccionar el mejor índice.

Consideraciones espectrales:

La figura 1 presenta la forma típica del espectro de un fruto inmaduro y de uno maduro respectivamente. La principal diferencia entre ellos es el pico de absorción de la clorofila a 680 nm, que desaparece cuando el fruto madura. Por tanto es conveniente, tal como muestra la introducción emplear 680 nm. Sin embargo al considerar una sola longitud de onda, la reflectancia aparente se ve afectada por dos fenómenos:

- Efecto multiplicativo: variaciones en la cantidad de luz que atraviesa cada zona del fruto que produce una variación general de la intensidad de la luz que llega al detector en todo el rango del espectro. No depende de la longitud de onda.
- Efecto aditivo: una especie de reflexión especular; es una parte de la luz que no penetra el fruto y es reflejada directamente por el fruto. Este efecto depende de la longitud de onda.

Considerando estos dos fenómenos se puede considerar la reflectancia aparente como la siguiente expresión:

$$R(\lambda) = K_1 R_0(\lambda) + F(\lambda)$$

donde λ es la longitud de onda, $R_0(\lambda)$ es la verdadera reflectancia (desconocida), K_1 es una constante y F es una función (normalmente lineal). La obtención de la verdadera reflectancia implica corregir ambos efectos, el multiplicativo y el aditivo:

- normalización consistente en dividir el espectro por una cantidad afectada por el efecto multiplicativo pero no relacionada con composición química o madurez.
- eliminación de la línea base del espectro. Esa operación se puede llevar a cabo o bien restando dicha línea de tendencia, o derivando el espectro. Dicha operación viene precedida de un suavizado del espectro. Se suele emplear el algoritmo de Savitsky y Golay (Gorry, 1990). La derivada de segundo orden es preferible porque elimina la línea de base y magnifica los picos.

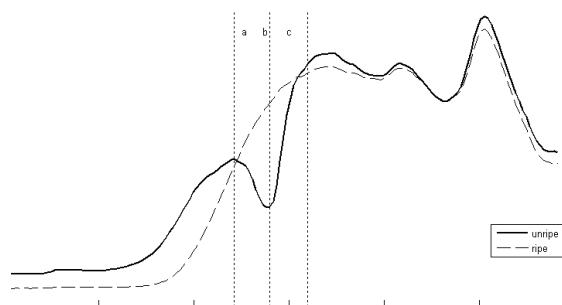


Figura 1. Ejemplo de dos espectros de reflectancia pertenecientes a dos melocotones diferentes: uno inmaduro, que presenta un pico de absorción en 680 nm; y otro maduro, que no presenta ningún pico en 680 nm. El eje x corresponde a las longitudes de onda (nm). El eje y corresponde al nivel de reflectancia de los espectros (unidades arbitrarias).

La aplicación de dichas correcciones al pico de la clorofila con un número limitado de longitudes de onda se puede hacer empleando tres reflectancias: R_a , R_c and R_b . Esas reflectancias corresponden a ambos lados del pico y al fondo respectivamente tal como se aprecia en la figura 1. Dos niveles de corrección se pueden hacer dando lugar a dos índices:

- La corrección de la línea de base se puede hacer mediante una aproximación a la derivada de segundo orden, computándose el Ind_1

$$Ind_1 = R_a + R_c - 2R_b$$

- La corrección del efecto multiplicativo se puede hacer en Ind_2 dividiendo el Ind_1 por el valor medio de las dos reflectancias R_a y R_c (que no dependen de la madurez):

$$Ind_2 = (R_a + R_c - 2R_b) / ((R_a + R_c) / 2)$$

Después de simplificar (dividiendo el numerador y el denominador por $R_a + R_c$) y eliminando términos constantes el Ind_2 queda:

$$Ind_2 = R_b / (R_a + R_c)$$

Basándonos en las consideraciones expuestas se proponen los siguientes índices combinando las longitudes de onda $\lambda_b=680$ nm, $\lambda_a=640$ nm and $\lambda_c=730$ nm: el Ind_1 corresponde aproximadamente a la profundidad del pico de absorción de la clorofila y el Ind_2 al pico relativo. El Ind_1 corrige el efecto aditivo y el Ind_2 el aditivo y multiplicativo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se adquirieron imágenes hiperespectrales desde 400 a 1000 nm (HYSPEX VNIR, Norsk Elektro Optikk AS, Norway) de 5 frutos antes y después del proceso de maduración, consistente en cuatro días a 10 ° C más tres días a temperatura ambiente. Se han considerado cuatro índices ópticos, dos de ellos los mencionados en el párrafo anterior Ind_1 e Ind_2 y otros dos propuestos en investigaciones previas; $Ind_3 = R_{675}/R_{800}$ propuesto por Herrero et al. 2011, Lleó et al 2009 y Sims and Gamon 2002, y $I_{AD} = \log_{10}(R_{720}/R_{670})$; Ziosi et al., 2008), siendo todos ellos combinación de distintas longitudes de onda alrededor del pico de absorción de la clorofila.

A partir de las imágenes hiperespectrales, se computaron las imágenes artificiales correspondientes a cada una de los cuatro índices estudiados. Para comparar las imágenes artificiales y determinar la bondad de los índices se aplicaron dos análisis:

- a) discriminación entre estados de madurez mediante el cómputo del estadístico Wilks' lambda Λ , para cada pareja de frutos antes y después de madurar; este estadístico es el ratio entre la suma de cuadrados entre grupos SS_B y la suma de cuadrados dentro de los grupos SS_W . Λ mide el poder discriminante de cada variable

$$\Lambda = \frac{SS_B}{SS_W} \quad (1)$$

Donde la suma de cuadrados dentro de los grupos se computa según la expresión siguiente donde j es el grupo y toma valores 1 (píxeles del fruto antes de madurar) ó 2 (píxeles del mismo fruto después de madurar), q es el número de grupos ($q=2$), n_j corresponde al número de píxeles de cada grupo, n_1 y n_2 ; \bar{Y}_j el valor medio del grupo j ; ($j=1,2$), Y_{ij} el valor del píxel (i) en el grupo (j) para el índice óptico Y .

$$SS_W = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2 = \sum_{i=1}^{n_1} (Y_{i1} - \bar{Y}_1)^2 + \sum_{i=1}^{n_2} (Y_{i2} - \bar{Y}_2)^2 \quad (2)$$

La suma de cuadrados entre los grupos es:

$$SS_B = \sum_{j=1}^q (\bar{Y}_j - \bar{Y}_{TOTAL})^2 n_j = n_1 (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_{TOTAL})^2 + n_2 (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_{TOTAL})^2 \quad (3)$$

Donde \bar{Y}_{TOTAL} es la media total considerando los dos grupos juntos. Λ varía desde 0 a ∞ . Cuanto mayor es Λ , más discriminante es la variable Y , y por lo tanto supuestamente más eficaz a la hora de detectar diferencias en el estado de madurez.

La ventaja de emplear Λ , en vez de la F de Fisher resultante de llevar a cabo un ANOVA, es que el valor de Λ es independiente del número de píxeles de la imagen, cosa que no sucede en el caso de la F de Fisher, que sí se ve afectada.

b) Robustez de los índices en cuanto al efecto de la convexidad de los frutos, para lo cual se generó una imagen artificial sustrayendo a cada pixel el valor del centro geométrico del fruto y posteriormente se calculó R entre este valor en cada píxel y la distancia al centro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Detección de la maduración. Cálculo de Wilks lambda.

La figura 2, izquierda, presenta los rangos para los nueve valores (eje y) para los 4 índices (eje x). Las cajas representan rangos intercuartiles y la mediana es indicada mediante una línea horizontal roja. Considerando la mediana la capacidad de detección de los cuatro índices es como sigue: $\Lambda(\text{Ind}_2) > \Lambda(\text{Ind}_1) > \Lambda(\text{I}_{AD}) > \Lambda(\text{Ind}_3)$. Considerando los rangos intercuartiles $\Lambda(\text{Ind}_1)$ y $\Lambda(\text{Ind}_3)$ varían en un grado mucho menor que $\Lambda(\text{I}_{AD})$ y $\Lambda(\text{Ind}_2)$.

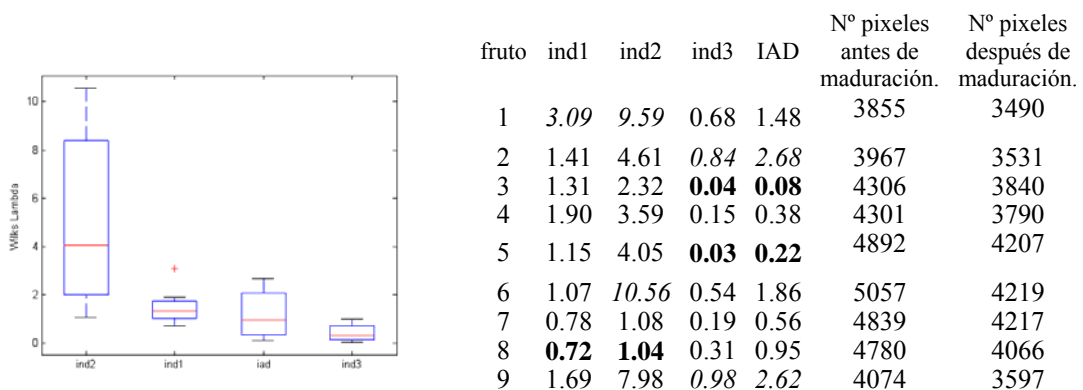


Figura 2. Izquierda. Rangos intercuartiles de Wilks' lambda Λ para los nueve frutos antes y después de madurar (eje y) y para los cuatro índices (eje x). Derecha, Tabla 1. Lambda de para cada índice y fruto antes y después de maduración. Los valores más bajos de Λ se indican en negrita, y los más altos en cursiva.

Los valores más altos de Λ siempre corresponden a Ind_2 (valores comprendidos entre 1 y 10.6). Ind_1 (Λ valores de 0.7 a 3.1), I_{AD} (0,08 a 2.7), y Ind_3 (0,03 a 0,98) difieren

de forma muy significativa de Ind_2 . Los rangos de Λ se superponen para estos tres índices tal como se observa en figura anterior.

b) Robustez de los índices en relación con convexidad del fruto

El coeficiente de correlación R entre las posiciones radiales y los valores de índice de todos los píxeles de todos los frutos (número de píxeles $n=75028$) antes y después de maduración oscila entre $R=0,01 - 0,24$ para los índices Ind_2 , Ind_3 e I_{AD} . Cuando se utiliza sólo 680 nm, la correlación es muy alta ($R=0,74$). Esto demuestra claramente el interés de los índices normalizados para aumentar la robustez de la medición. Entre los índices, sólo Ind_1 parece estar afectado por la posición radial de frutos inmaduros ($R=0,64$), hecho que se confirma en las imágenes en la figura 2, primera fila, donde se muestra claramente el efecto de la convexidad.

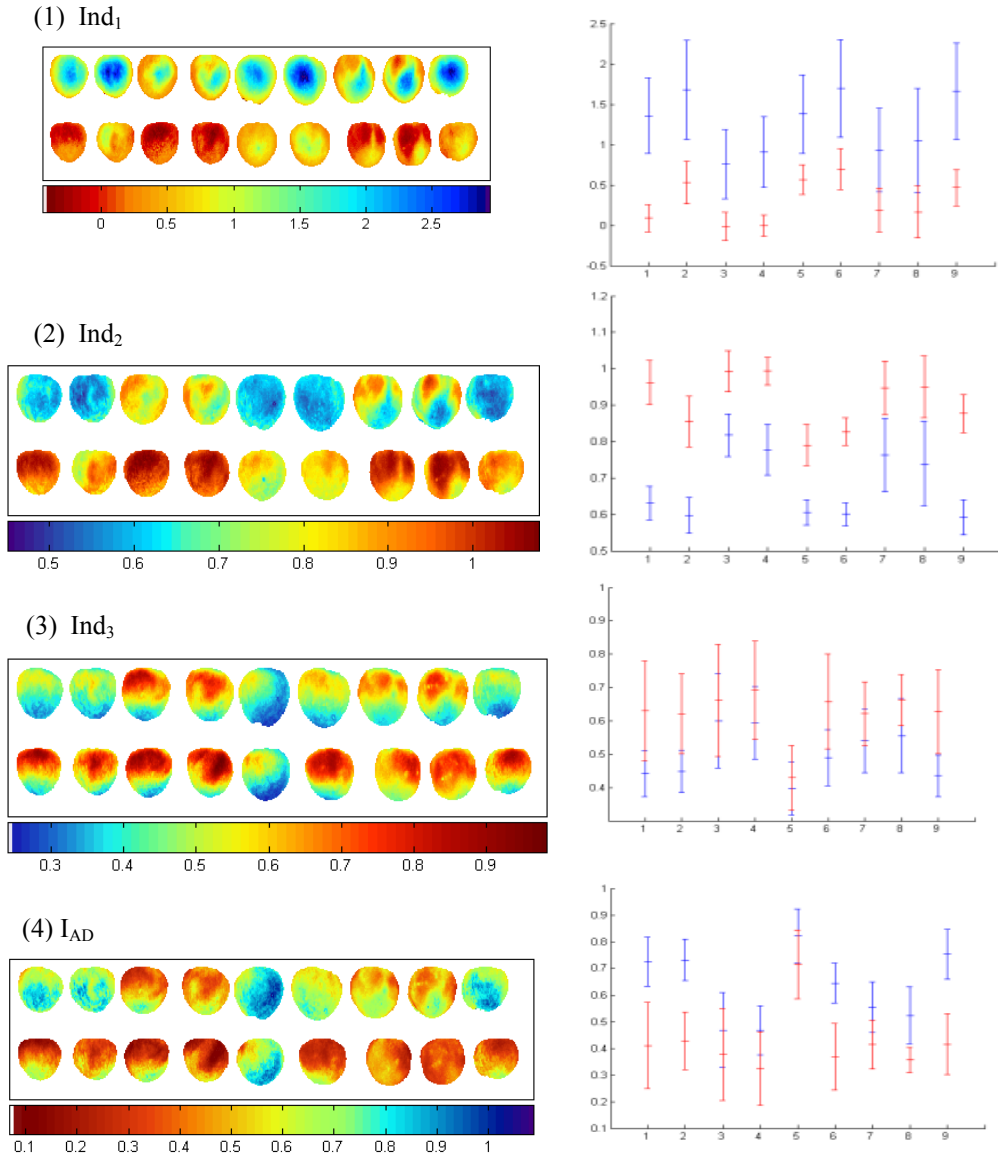


Fig. 3. Las líneas 1, 2, 3 y 4 corresponden a Ind_1 , Ind_2 , Ind_3 y I_{AD} , respectivamente. Columna de la izquierda: imágenes de reflectancia para los nueve frutos antes (primera línea de la imagen) y después la maduración (segunda línea). Azul corresponde a las áreas más inmaduro y rojo para las maduras. Las cifras de las barras de color indican la magnitud de los valores. Columna de la derecha: promedio más menos desviación típica dentro del fruto; eje 'x' representa cada fruto; eje 'y' representa el valor del índice. Líneas verticales azules corresponden a los frutos antes de maduración y rojo a los mismos frutos después de maduración.

La figura 3 muestra las imágenes de los índices computadas sobre las imágenes hiperspectrales (a la izquierda) y sus rangos correspondientes (derecha). Todos los índices reflejan la evolución durante el proceso de maduración. Ello se explica porque todos los índices incluyen la reflectancia a 680 nm. Esto corrobora la relación observada en otros estudios entre madurez y reflectancia /absorbancia a 680 nm (Ferrer et al, 2005; Qin y Lu, 2008; Lu y Peng, 2006). Sin embargo estos estudios precedentes no abordan el fruto en su conjunto sino sólo pequeñas áreas de su superficie.

También se muestra que algunas zonas más maduras en el momento de la cosecha presentan un incremento en el valor del índice y en la superficie después del proceso de maduración; este hecho es destacable en los casos de Ind_2 , Ind_3 e I_{AD} , y ya fue señalado por Crisosto et al. (2001) que observó que el proceso de maduración no es homogéneo en el fruto.

Ind_2 produjo la mayor separación entre los rangos de los frutos antes y después de madurar, mientras que en los casos de Ind_3 e I_{AD} se produce cierto grado de solapamiento, resultado concordante con lo analizado para Wilks lambda (figura 2), donde Ind_2 produjo siempre el Λ más alto en los nueve pares de frutos. Por ello Ind_2 podría ser el mejor índice con respecto capacidad de la discriminación e Ind_3 el peor (máximo solapamiento antes y después que maduran). Debido a que Ind_2 es un índice normalizado (y por lo tanto más robusto que Ind_1) y enfocado exactamente en la forma del espectro en el pico de absorción de la clorofila, es el que mejor caracteriza el proceso de maduración. Este resultado confirma la necesidad en este caso de compensar efectos multiplicativo y aditivo al considerar imágenes de reflectancia.

CONCLUSIONES

La presente investigación propone dos nuevos índices, Ind_1 e Ind_2 , que se comparan con otros dos usados en investigaciones anteriores; Ind_3 (Lleó y otros., 2009; Sims y Gamon, 2002) e I_{AD} (Ziosi, 2008). Todos estos índices fueron extraídos de imágenes hiperspectrales, y sus imágenes multispectrales correspondientes fueron computadas. El sistema de la imagen de hiperspectral se emplea para buscar la mejor combinación de longitudes de onda con respecto a la determinación del estado de maduración.

Ind_2 fue el índice que presentó mayor poder de discriminación entre estados de madurez, mostrando la máxima separación de los rangos de los frutos antes y después de madurar y ningún efecto de la convexidad. Por otra parte permite la diferenciación de áreas de maduración dentro de los frutos, mostrando la evolución de esas regiones durante la maduración. Para corroborar los resultados obtenidos sería necesario ampliar este estudio aumentando tanto el tamaño de las muestras como las variedades a considerar.

4. AGRADECIMIENTOS (en caso de que haya)

Proyecto Europeo ISAFRUIT CT-06-016279 (FOOD)

Proyecto Plan Nacional: Multihort – AGL2008-0566-C02-01

5. BIBLIOGRAFÍA

- Herrero-Langreo A., Lunadei L., Lleó L., Diezma B., Ruiz-Altisent M. (2011) *Multispectral Vision for Monitoring Peach Ripeness*. *Journal of Food Science*, Vol. (76), Nr 2, 178-187.
- Crisosto, C. H., Slaughter, D. C., Garner, D. & Boyd, J. (2001). *Stone fruits critical bruising thresholds*. *Journal American Pomological Society*, 55(2), 76-81.
- Diezma-Iglesias, B., Valero, C., García-Ramos, F.J., & Ruiz-Altisent, M. (2006). *Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods*. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 926-935.
- Lu, R. & Peng, Y. (2006) *Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness*. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161-171.
- Lleó, L., Barreiro, P., Ruiz-Altisent, M. & Herrero, A. (2009) *Multispectral images of peach related to firmness and maturity at harvest*. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 229-235.
- Qin, J.; Lu, R. (2008) *Measurement of the optical properties of fruits and vegetables using spatially. resolved hyperspectral diffuse reflectance imaging technique*. *Postharvest Biology and Technology*, 49, 355–365
- Sims, D. A. & Gamon, J. A. (2002) *Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages*. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 337-354.
- Xue, L. & Yang, L. (2009) *Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 97-106.
- Ziosi, V., Noferini, M., Fiori, G., Tadiello, A., Trainotti, L., Casadoro, G. & Costa, G. (2008) *A new index based on vis spectroscopy to characterize the progression of ripening in peach fruit*. *Postharvest Biology and Technology*, 49(3), 319-329.
- Zude, M. (2003) *Comparison of indices and multivariate models to non-destructively predict the fruit chlorophyll by means of visible spectrometry in apple fruit*. *Analytica Chimica Acta*, 481(1), 119-126.